Luftwiderstandsmessungen

mit einem neuen Rotationsapparat.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer

hohen naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Eberhard-Karl-Universität Tübingen

vorgelegt

von

Otto Mannesmann

stud. rer. nat.

aus Remscheid.

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

(1890)

Berlin.

Buchdruckerei von Gustav Schade (Otto Francke)

Linienstrasse 158.

Von der Fakultät angenommen am 15. December 1897.

Meiner Mutter gewidmet.

Inhalt.

Seite

Einleitung: Die verschiedenen Möglichkeiten der Messung des Luftwiderstandes 7

I. Teil. Bestimmung des Luftwiderstandes, wenn die Bewegung senkrecht zur Fläche erfolgt.

§ 1. Die bisherigen Rotationsapparate 9

§ 2. Der neue Rotationsapparat 12

§ 3. Beseitigung der Bedenken gegen die neuen Methoden der Messung 16

§ 4. Anwendungen des Apparates.

1. Ebene Flächen 20

2. Durchlöcherte Flächen 29

3. Gewölbte Flächen 31

II. Teil. Bestimmung des Luftwiderstandes, wenn die Bewegungsrichtung einen beliebigen Winkel mit der Fläche bildet.

§ 1. Die bisherigen Methoden der Messung 33

§ 2. Die neue Methode der Messung 35

§ 3. Anwendung des Apparates.

1. Ebene Flächen 39

2. Gewölbte Flächen 41

III. Teil. § 1. Einfluss der Temperatur und des Barometerstandes 44

§ 2. Einfluss des Mitwindes 45

§ 3. Der Widerstand von zwei dicht hintereinander bewegten Scheiben 47

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552309_0165

Einleitung.

Die ersten genauen Versuche über den Widerstand, den feste Körper erfahren, wenn sie im gaserfüllten Raum einer Bewegung unterworfen werden, sind erst vor etwa 30 Jahren von Schellbach angestellt worden[1]). Doch in dem Maasse, wie in den letzten Jahrzehnten das Problem des mechanischen Fluges mit in den Vordergrund des öffentlichen Interesses getreten ist, haben sich auch hervorragende Physiker der Gegenwart, wie S. P. Langley, Lord Rayleigh, G. Wellner u. a. mit Experimenten über Luftwiderstände befasst. Trotzdem ist auch heute noch das ganze Gebiet der Aëromechanik in geheimnisvolles Dunkel gehüllt. Weichen doch die von den verschiedenen Forschern gemachten Beobachtungen so erheblich von einander ab, dass man kein Resultat als vollständig fehlerfrei ansehen kann. Der Grund hierfür ist in der Unvollkommenheit der Vorrichtungen zu suchen, mit denen die Versuche angestellt werden.

Die zunächst in Betracht kommende Vorrichtung, die dem Körper, dessen Luftwiderstand man messen will, eine geradlinig gleichförmige Bewegung erteilt, erfordert sehr komplizierte Mechanismen, und die umgekehrte Methode, einen konstanten Luftstrom gegen

---

[1]) K. H. Schellbach, „Über einen Apparat zur Ermittelung der Gesetze des Luftwiderstandes“. Pogg. Ann. 143, p. 1, 1871.

den ruhenden Körper zu schicken, ist auch unzweckmässig, da bei künstlich erzeugten Luftströmen infolge der Reibung der Luft an den Wänden des Ausflussrohres und infolge ihrer Reibung mit benachbarten ruhenden Luftschichten die einzelnen Punkte des Querschnittes verschiedene Geschwindigkeiten haben.

Diese Schwierigkeiten glaubte man zu umgehen, indem man den Wind zu Hülfe nahm. Man setzte den auf seinen Luftwiderstand zu untersuchenden Körper einem natürlichen Luftstrom aus, ermittelte mit einem Anemometer die Geschwindigkeit desselben und bestimmte dann durch eine in geeigneter Weise angebrachte Messvorrichtung die Kraft, mit der der Körper sich in Richtung des Windes fortzubewegen strebte[1]).

Aber alle auf diesem Princip beruhenden Versuche sind wertlos geworden, nachdem S. P. Langley[2]) nachgewiesen hat, dass der Wind niemals die gleiche Geschwindigkeit auch nur eine Sekunde lang beibehält, sich vielmehr aus rasch aufeinander folgenden Stössen zusammensetzt.

Langley machte die Versuche mit einem sehr empfindlichen Robinsonschen Anemometer mit Papierschalen, die bei jeder halben Umdrehung auf einen Chronographen eine Marke aufzeichneten. Die Windgeschwindigkeit schwankte oft mehrere Male in einer Sekunde zwischen 0 und 25 m.

Wir haben es daher hier mit sogenannten Schlagbewegungen zu thun, bei welchen, wie O. Lilienthal gezeigt hat, unter Umständen der Luftwiderstand das

---

[1]) W. H. Dines, „On wind pressure upon an inclined surface". Proceedings of the royal society of London 48, 1890, p. 233.

Ferner O. Lilienthal, „Der Vogelflug als Grundlage der Luftschifffahrt". Gaertners Verlag, Berlin 1889.

[2]) S. P. Langley, „The internal work of the wind". Philosophical magazine and journal of science. London 37, p. 425.

25 fache des Wertes annehmen kann, der ihm bei gleichförmiger Bewegung zukommt.

Professor Schellbach war der erste, der zur Untersuchung des Luftwiderstandes einen Rotationsapparat angewendet hat, und gebührt ihm ferner das grosse Verdienst, denselben gleich auf eine grosse Höhe der Vervollkommnung gebracht zu haben.

Heute werden, abgesehen von den Versuchen mit Fallschirmen, zur Untersuchung der Luftwiderstandsgesetze ausschliesslich Rotationsapparate verwendet.

I. Teil.

Bestimmung des Luftwiderstandes ebener und gewölbter Flächen, die einer zur Fläche senkrechten Bewegung unterworfen werden.

§ 1. Die bisherigen Rotationsapparate.

Zur Veranschaulichung der Vorzüge des von mir angewandten Apparates ist es zweckmässig, das Princip der Rotationsapparate kurz zu beschreiben, deren man sich bei den bisherigen Untersuchungen über Luftwiderstände bedient hat.

Der schon erwähnte Schellbachsche Apparat besteht im wesentlichen aus einem horizontalen Stahlstabe, der um seine verticale Axe vermittelst eines Rädergetriebes in Rotation versetzt werden kann und der an seinen beiden Enden die zu untersuchenden Flächen trägt. Der Stab wird geführt in zwei Messinggabeln, die die Form einer Schraubenfläche haben und deren Ansteigen 45^0 beträgt. Durch kleine Rollen,

deren Stahlaxen in Rubinen laufen, wird in der Führung die Reibung verschwindend klein gemacht. Setzt man den Apparat in Bewegung, so haben infolge des Luftwiderstandes der Platten die Stahlarme das Bestreben, sich in den Gabeln nach unten zu verschieben. Da aber ihre Axe mit einer auf Wasser schwimmenden Messingkugel verbunden ist, so wird der senkrechten Verschiebung der Axe ein gewisser Widerstand geleistet. Die Messingkugel wird soweit nach unten gedrückt, bis das Gewicht der durch sie verdrängten Wassermasse gleich dem Widerstand ist, den die Luft der Bewegung der Platten und der dieselben tragenden Arme entgegensetzt. Die Grösse der senkrechten Verschiebung der Axe wird mit Hülfe eines Fernrohres genau bestimmt. Die Geschwindigkeit der zu untersuchenden Flächen kann in den Grenzen von 17 cm bis zu 6 m pro Sekunde variiert werden.

Einen ähnlichen Zweck wie die Versuche von Schellbach verfolgen auch die Untersuchungen von Recknagel[1]), der eine Methode angiebt, die Intensität des Luftdruckes zu messen, die ein Körper bei bestimmter Geschwindigkeit an einer bestimmten Stelle seiner Oberfläche erfährt.

An der zu untersuchenden Stelle wird ein rundes Loch ausgeschnitten, das durch eine luftdichte Röhre mit einem im Mittelpunkt des Rotationsapparates feststehenden abgeschlossenen Gefäss verbunden ist. Von diesem Gefäss aus führt ein Kautschuckschlauch nach einem Differentialmanometer, das den Zweck hat, die Spannungsunterschiede anzugeben, welche zwischen der im Mittelpunkt der Drehung befindlichen Luft und der Luft der Umgebung bestehen.

Im Gegensatze zu Schellbach und Recknagel haben

---

[1]) Recknagel, Fortschr. d. Physik 42, I, p. 404, 1886.

W. H. Dines[1]) und S. P. Langley[2]) ihre Versuche in grossartigem Massstabe unter Aufwendung bedeutender Geldmittel angestellt. Während der rotierende Stahlstab bei Schellbach eine Länge von 0,34 m besitzt, hat Langley bei seinem Apparat einen als Brückenträger ausgebildeten horizontalen Stab von 60 Fuss Länge, der durch eine 10pferdige Dampfmaschine vermittelst eines Treibriemens um seine verticale Axe in Rotation versetzt wird. Durch Variieren der Tourenzahl der Dampfmaschine und durch gleichzeitiges Umschalten des Treibriemens können Umfangsgeschwindigkeiten des Dreharmes von 4,5 bis 45 m pro Sekunde erzeugt werden; doch war infolge des Schleifens des Treibriemens die höchste thatsächlich erreichte Geschwindigkeit nur 30 m pro Sekunde. Die Geschwindigkeit ist in jedem Augenblick auf einem Chronographen zu ersehen, auf den die Bewegung durch eine elektrische Vorrichtung eingetragen wird. Der Luftwiderstand, den die am rotierenden Stab angebrachten Flächen zu überwinden haben, wird mit einem komplizierten Dynamometer gemessen. Um eine Beeinflussung der Erscheinungen durch naheliegende Gebäude oder Bäume zu verhindern, wurde der Apparat auf einem vollständig kahlen, 400 Fuss hohen Berg aufgestellt.

Was mich veranlasste, die vielen schon bestehenden Rotationsapparate noch um einen zu vermehren, war die Überzeugung, dass bei den bisherigen Konstruktionen der einzelne Versuch zu umständlich und zeitraubend ist und dass man bei demselben den Verlauf der Erscheinungen nicht klar genug übersehen

---

[1]) W. H. Dines, „Proceedings of the royal society of London“ 50 (1891), p. 42.

[2]) S. P. Langley, „Experiments in aerodynamics“, Smithomian contributions of knowledge 801 (1891), Washington oder Beibl. d. Wied. Ann. 16, p. 388, 1892.

kann. Bei Experimenten über Luftwiderstände ist man nämlich so mannigfaltigen Fehlerquellen ausgesetzt, dass man nur dann einwandfreie Mittelwerte erhalten kann, wenn dieselben aus einer grossen Zahl von einzelnen Beobachtungen bestimmt werden.

In welchem Maasse die in der vorliegenden Arbeit angewandte Methode den an sie gestellten Anforderungen genügt, wird sich aus den gewonnenen Resultaten ergeben.

§ 2. Der neue Rotationsapparat. Vergl. d. Tafel.

Die zu untersuchende Fläche F wird an einem in horizontaler Ebene rotierenden Messingarm A von 0,485 m Länge so befestigt, dass sie sich nur in Richtung der Bewegung des Armes in einer Führung f verschieben kann. Die Verschiebung der Fläche in der der Bewegung entgegengesetzten Richtung wird gehemmt durch einen straff angezogenen Seidenfaden S, der, von der Fläche ausgehend, über eine in der Verlängerung der Führung liegende Rolle R läuft und in der verticalen Axe des Apparates mit einem durch ein Gewicht G angespannten verticalen Faden S_1 so befestigt ist, dass er um denselben möglichst reibungslos rotieren kann. Wenn man die Fläche in der Führung nach rückwärts verschiebt, so erfährt der verticale Faden eine seitliche Ausbiegung, wobei das ihn belastende Gewicht gehoben wird, und zwar um so mehr, je weiter die Rückwärtsbewegung der Fläche in der Führung fortschreitet. Wird der Apparat in Rotation versetzt, so bewirkt der Luftwiderstand der Fläche ihre Rückwärtsverschiebung in der Führung und somit ein Heben des Gewichtes G.

Die Verschiebung der Fläche hört erst auf, wenn der Zug in dem Seidenfaden dem Luftwiderstand das Gleichgewicht hält.

Infolgedessen entspricht jedem Luftwiderstand eine ganz bestimmte Hebung des Gewichtes. Das Gewicht ist mit einem Aluminiumzeiger Z von 65 cm Länge im Abstand von 0,65 cm von der Drehaxe fest verbunden, so dass seine verticalen Verschiebungen auf einer Messingscala M, an welcher der Zeiger entlang geht, in 100facher Vergrösserung sichtbar gemacht werden.

Der bei der Konstruktion des Apparates leitende Gesichtspunkt war, die rotierenden Massen klein zu halten und denselben eine solche Gestalt zu geben, dass sie möglichst geringe Luftbewegungen hervorrufen. Meine Vorrichtung besitzt deshalb im Gegensatz zu allen bisherigen Apparaten nur einen rotierenden Arm. Derselbe wurde als einfacher Brückenträger ausgebildet, dessen obere „Gurtung" ein zur Axe hin sich verdickender Messingarm ist, dessen untere „Gurtung" aus gehärtetem Kupferdraht von 1,2 mm Dicke besteht und bei dem ein 1,2 mm dicker, 1,5 mm breiter und 70 mm langer Messingstab als Diagonalverband dient. Der Querschnitt der oberen Gurtung ist ein Rhombus, dessen grössere Diagonale 10 bis 20 mm lang ist, während die kleinere nach der Axe hin allmählich von 3 auf 7 mm steigt. Dieser Brückenträger durchschneidet fast ohne Widerstand die Luft, und selbst bei 500 Umdrehungen pro Minute verursacht er nur unbedeutende Luftströmungen.

Die rotierende Messingaxe B von 15 mm Durchmesser und 200 mm Länge trägt am oberen Ende eine Riemscheibe L von 60 mm Durchmesser, die durch einen Lederriemen mit der Kraftmaschine verbunden ist, und ferner eine mit einem Gummirand armierte Scheibe L_1 von demselben Durchmesser, die auf dem Rade eines Tourenzählers T rollt. Der Apparat wird getragen von einer 2 m langen massiven quadratischen Stange C aus Schmiedeeisen, die bei einer Dicke von

60 mm keine Vibrationen zulässt und die einerseits mit einer in die Zimmerwand eingemauerten Steinkonsole K fest verbunden ist, während das andere Ende auf einem gusseisernen Gestell E ruht. Der zum Aluminiumzeiger Z führende verticale Faden geht durch das 2 mm weite Loch der rotierenden Axe B von einem mit dem schmiedeeisernen Träger fest verbundenen Holzstab H aus, der zugleich zur Befestigung des Tourenzählers dient. Die verticale Einstellung des Fadens wird durch einen „Support" U ermöglicht, der den Aluminiumzeiger trägt. Der Zeiger ist durch ein Gegengewicht teilweise ausbalanciert, während ein verschiebbares Gewicht N von 28 g verschiedene Fadenspannungen hervorrufen kann. Die mit 200 Teilstrichen versehene Messingscala M ist ein 40 cm langer und 2 cm breiter Kreisbogen.

Als Kraftquelle diente für kleine Rotationsgeschwindigkeiten eine Turbine von $^1/_{20}$ P.S., die durch Wasserleitungswasser, das unter einem Druck von 6 Atmosphären steht, getrieben wird. Mittlere Rotationsgeschwindigkeiten wurden durch einen Siemens-Elektromotor von max. $^1/_4$ P.S. erzeugt, und für Geschwindigkeiten von 15—25 m pro Sekunde wurde ein grösserer Siemens-Elektromotor von max. $^1/_2$ P.S. verwendet. Der elektrische Strom für die Motoren wurde von einer aus 36 Elementen bestehenden Accumulatorenbatterie von 72 Volt Spannung geliefert.

Für die beabsichtigten Versuche war es erforderlich, die Tourenzahl des Elektromotors in weiten Grenzen variieren zu können. Es musste daher das Augenmerk auf die in den Stromkreis einzuschaltenden Widerstände gerichtet werden.

Um die Beobachtungsfehler zu verkleinern, wurde der einzelne Versuch auf mindestens 500 Umdrehungen ausgedehnt. Hierbei machte es sich störend bemerk-

bar, dass infolge der starken Erwärmung der eingeschalteten Drahtwiderstände der Motor am Ende des Versuchs eine geringere Geschwindigkeit besass wie am Anfang. Eine genaue Beobachtung war dadurch ausgeschlossen, indem während des Versuches der Aluminiumzeiger langsam sank. Dieser Übelstand wurde dadurch fast vollständig beseitigt, dass eine Combination von Draht- und Flüssigkeitswiderständen eingeschaltet wurde. Da bei Flüssigkeiten im Gegensatz zu den metallischen Leitern die Leitungsfähigkeit mit wachsender Temperatur zunimmt, so kann man, nachdem man durch Versuche das richtige Verhältnis zwischen Draht und Flüssigkeit ermittelt hat, einen für alle Temperaturen fast constanten Gesamtwiderstand herstellen.

Der übrigbleibende Rest der Unregelmässigkeit der Bewegung wurde durch die am Elektromotor befindliche, mit der Hand zu regulierende Bandbremse soweit beseitigt, dass z. B. für 1000 Umdrehungen die Zeitunterschiede bei 10 Beobachtungen $^2/_{10}$ Sekunden nicht überstiegen, was einem möglichen Fehler von 1,5 Promille entspricht. Der Flüssigkeitswiderstand konnte durch Verschieben der Elektroden in seiner Breite und Länge geändert werden. Der grösste angewandte Widerstand hatte eine Länge von 20 cm und einen Querschnitt von 5,20 qcm; der kleinste aber eine Länge von 5 cm und einen Querschnitt von 5,2 qcm. In dem letzten Widerstand stieg zuweilen die Temperatur während des Versuches auf 40° Celsius, ohne dadurch den gleichmässigen Gang des Elektromotors zu beeinträchtigen. Bei den ersten Versuchen wurde eine 25procentige Salmiaklösung (Leitungsvermögen bei 18° C. 0,0000048) zwischen Platinelektroden eingeschaltet, wegen des auftretenden Polarisationsstromes aber bald durch einen Widerstand aus 15procentiger Kupfersulfatlösung (Leitungsvermögen bei 18° C. 0,0000039) zwischen Kupferelektroden ersetzt.

Dieser letztere Widerstand hat sich sehr gut bewährt, nur mussten die Kupferelektroden häufig ersetzt werden. Die Metallwiderstände wurden von 3 Widerstandskästen geliefert. Der erste Kasten gestattete 8, der zweite 9 und der dritte 11 Variationen, so dass man durch richtiges Hintereinanderschalten jeden gewünschten Gesamtwiderstand erhalten konnte.

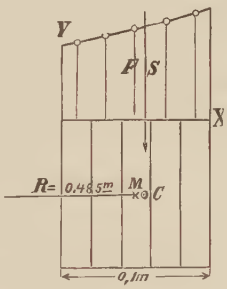
§ 3. Beseitigung etwaiger Bedenken gegen den Rotationsapparat.

Bei der Bewegung eines Körpers wird die ihn umgebende Luft in Bewegung gesetzt, die hauptsächlich darin besteht, dass die Luft vor dem Körper auseinander und hinter ihm wieder zusammengeht und dass gleichzeitig Luftwirbel entstehen. Der Luftwiderstand kommt aber nur dann rein zur Geltung, wenn für die abfliessenden Luftteilchen keine Richtung bevorzugt ist. Jeder Rotationsapparat hat aber den Nachteil, dass, infolge der ungleichen Geschwindigkeit der einzelnen Teile der Scheibe, ein von dem inneren nach dem äusseren Rande hinfliessender Luftstrom entsteht.

Der Luftstrom wird bekanntlich dahin gelenkt, wo die stärkste Luftverdünnung eingetreten ist. Dieses ist aber hinter dem äusseren Rande der rotierenden Fläche geschehen, da derselbe die grösste Geschwindigkeit besitzt. Diese Fehlerquelle wurde dadurch möglichst verkleinert, dass man meistens nur kleine Flächen bis zu 10 cm Durchmesser untersuchte, was bei der grossen Empfindlichkeit des Apparates keinen Nachteil hatte. Bei grösseren Flächen wurde die Geschwindigkeit so klein gewählt, dass die Luftströmungen überhaupt keine Rolle mehr spielen konnten.

Auch der Umstand, dass die Flächen in ihrem Mittelpunkt geführt werden, schliesst eine kleine Gefahr

in sich. Teilt man nämlich ein Quadrat in viele gleiche verticale Streifen und trägt die diesen Streifen entsprechenden Luftwiderstände als Ordinaten auf, so schliesst die durch die Endpunkte derselben gelegte Curve mit den Koordinatenaxen eine Fläche F ein, deren Schwerlinie S das Centrum C des auf das Quadrat wirkenden Luftwiderstandes liefert. Dasselbe fällt, wie aus der nebenstehenden Figur ersichtlich ist, nicht mit dem geometrischen Mittelpunkt M der Fläche zusammen; infolgedessen tritt eine Klemmung in der Führung ein, wodurch die Verschiebbarkeit erschwert wird. Betrachtet man statt des Quadrates eine kreisrunde Scheibe, so erhält man eine kompliziertere Widerstandsfläche, doch weicht auch in diesem Falle das Centrum des Widerstandes vom Mittelpunkt des Kreises ab. Eine Klemmung kann nur eintreten, wenn Körper aneinander gleiten, nicht aber, wenn man es nur mit rollender Reibung zu thun hat. Es wurde deshalb eine Führung verwendet, bei der zwischen dem beweglichen Mantel und dem festen Kern 2,2 mm dicke gehärtete Stahlkugeln eingelegt waren.



Da die Stahlkugeln aber das Gewicht wesentlich erhöhen, wurden bei den späteren Versuchen die Kugeln weggelassen und die Klemmung dadurch vermeiden, dass man den von der verticalen Axe des Apparates kommenden Seidenfaden nicht an der Führung befestigte, sondern ihn kurz vor seinem Ende verzweigte und an drei nahe der Peripherie liegenden Punkten der Fläche angreifen liess. Die Führung hat jetzt nur noch den Zweck, eine seitliche Verschiebung der Fläche zu verhindern.

Grosse Schwierigkeiten verursachte anfänglich die auftretende Centrifugalkraft, die, wie an einem Beispiel erläutert werden soll, unter Umständen eine ganz bedeutende Rolle spielen kann. Die zu den ersten Versuchen verwendete Führung aus Kupfer wog mit der auf ihr befestigten runden Scheibe aus Zinkblech, von 10 cm Durchmesser und $^3/_{10}$ mm Dicke, 35 g. Die Umfangsgeschwindigkeit betrug 20 m; der Rotationsarm hatte eine Länge von 0,485 m.

Die Centrifugalkraft, nach der Formel $F = \frac{m v^2}{R}$ berechnet, war also in diesem Falle nicht weniger wie 2,8 kg, während der Luftwiderstand des Zinkblechs nur etwa 0,27 kg betrug. In obiger Formel ist die Masse m in kg, der Krümmungsradius R und die Geschwindigkeit v in m einzusetzen. Wenn nun auch in der Führung der Reibungskoefficient sehr klein ist ($\mu = 0{,}03$), so war doch zur Verschiebung eine Kraft von 84 g erforderlich, das sind 31 Procent des gesamten Luftwiderstandes, und folglich war es unwahrscheinlich, dass die Führung sich genau auf den dem Widerstand der Fläche entsprechenden Punkt einstellte.

Es war notwendig, das Gewicht der rotierenden Masse bedeutend zu verkleinern und wurden deshalb sowohl die Führung als auch die Flächen aus Aluminium verfertigt.

Es gelang auf diese Weise, das Gewicht der Führung mit der auf ihr befestigten Scheibe in den Grenzen von 3,5 bis 5,5 g zu halten. Die Aluminiumscheiben hatten eine Dicke von 0,2 mm und waren gegen Verbiegung durch einen Rand von doppelter Dicke verstärkt. Die grösseren Flächen von 12—20 cm Durchmesser wurden aus einem mit Pergamentpapier beklebten Ring aus Aluminiumdraht von 2 mm Dicke hergestellt, nachdem Versuche mit Aluminium- und

Papierscheiben von gleicher Grösse gleiche Resultate und damit den Beweis geliefert hatten, dass durch das Pergamentpapier keine Luft durchdringen konnte.

Bei diesen leichten Flächen spielt die Centrifugalkraft keine grosse Rolle mehr. Die zur Verschiebung der Führung nötige Kraft beträgt, wie Versuche ergeben haben, im ungünstigsten Falle etwa 4 Procent, meistens aber nur 2 Procent des gesamten Luftwiderstandes. Den nur schwer zu ermittelnden Wert dieser Reibung kann man dadurch eliminieren, dass man beim ersten Versuch von geringerer Geschwindigkeit, beim zweiten Versuch dagegen von höherer Geschwindigkeit aus auf die gewünschte Geschwindigkeit übergeht und den Mittelwert der beiden Beobachtungen nimmt. Die erste Beobachtung giebt dann den Luftwiderstand vermindert um die Führungsreibung an, während beim zweiten Versuch der Wert der Reibung sich zum Luftwiderstand addiert, da jetzt die Fläche sich mit dem Führungsmantel nach vorn bewegt.

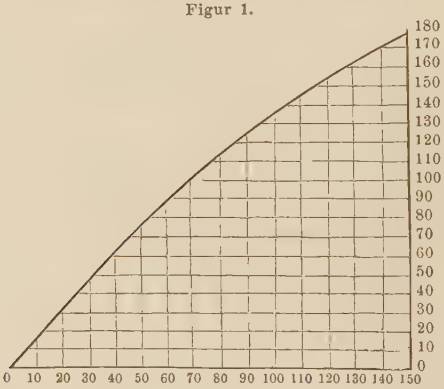
Noch einfacher ist es, wenn man während des einzelnen Versuchs die Geschwindigkeit häufig um den Mittelwert herum kleinen Schwankungen unterwirft. Steigt die Geschwindigkeit über den Mittelwert, so verschiebt sich die Fläche nach rückwärts. Im nächsten Augenblick, entsprechend der Verlangsamung der Bewegung, rückt sie wieder vor und stellt sich allmählich auf den Punkt, der ihrem thatsächlichen Widerstand entspricht. Diese kleinen Geschwindigkeitsänderungen werden durch mehr oder weniger starkes Anziehen einer Bandbremse auf einfache Weise hervorgebracht.

§ 4. Anwendung der neuen Methode.

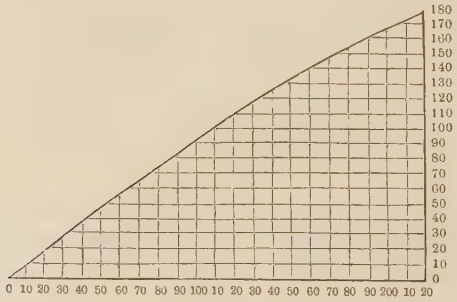
1. Ebene Vollflächen.

Zunächst muss die Scala, an welcher der Aluminiumzeiger entlang geht, geaicht werden. Dies geschieht, indem man, während der Apparat in Ruhe ist, den von der Mitte aus zur Führung gehenden Seiden-

Figur 1.



Figur 2.



faden über eine Rolle leitet und dann mit Gewichten belastet. Jedem Fadenzug entspricht eine ganz bestimmte Stellung des Zeigers.

In Figur 1 und 2 sind die Spannungen im Faden als Abscissen und die entsprechenden Zeigerstellungen

als Ordinaten aufgetragen. In der Figur 1 ist der Zeiger nicht belastet, und beträgt hier der grösste noch zu messende Fadenzug 150 g. Im anderen Falle ist der Zeiger mit einem Gewicht von 28 g im Abstande 30 mm von der Drehaxe belastet und kann man jetzt auf der Scala noch einen Fadenzug von 220 g ablesen. Wenn mit noch grösseren Kräften wie 220 g gearbeitet wurde, was selten vorkam, so musste man das Gewicht auf dem Zeiger noch weiter von der Drehaxe entfernen und eine neue Aichungscurve ermitteln.

Aus der graphischen Darstellung der zwischen Zeigerstellung und Fadenzug bestehenden Beziehungen ist ersichtlich, dass in den meisten Stellungen dem Steigen des Zeigers um einen Teilstrich eine Vermehrung des Fadenzuges um 1 g entspricht.

Die Empfindlichkeit der Methode hängt davon ab, mit welcher Genauigkeit man die Zeigerstellung ablesen kann und ob es überhaupt möglich ist, eine genügende Ruhe des Zeigers zu erzielen. Die letztere Bedingung verursachte nicht unerhebliche Schwierigkeiten, die erst vollständig gehoben wurden, nachdem der in der verticalen Axe des Apparates befindliche belastete Faden durch dünne Kupferdrähte ersetzt wurde, die durch Gelenke die gewünschte seitliche Ausbiegung ermöglichten, die aber nicht wie die vorher angewandten Seiden- oder Zwirnfäden sich tordierten.

Zur Illustrierung der Beobachtungsmethode soll zunächst der Verlauf der Versuche beschrieben werden.

Die Anordnung ist so gewählt, dass der Beobachter von seiner Stellung vor der Scala aus die in Betracht kommenden Erscheinungen bequem übersehen kann. Nachdem der Apparat in Bewegung gesetzt worden ist, muss zunächst mit Hülfe der Bandbremse, die während des ganzen Versuchs mit der rechten Hand reguliert wird, die erforderliche Ruhe des Zeigers hergestellt

werden. Sodann wird in dem Augenblick, wo der Zeiger des Tourenzählers auf 0 steht, mit der linken Hand ein Chronoskop in Bewegung gesetzt. Nach weiteren 500 Umdrehungen wird das Chronoskop arretiert, der Stand des Aluminiumzeigers abgelesen und durch den Unterbrecher der elektrische Strom geöffnet.

Während des Versuchs müssen Fenster und Thüren geschlossen sein und jede hastige Bewegung des Körpers vermieden werden, da der geringste Luftzug sich durch Schwanken des Zeigers störend bemerkbar macht. Die Versuche können ferner nur bei Tages- oder elektrischem Licht gemacht werden, da Gas- und Kerzenflammen nicht unerhebliche Luftbewegungen hervorrufen und ferner die bei der Verbrennung sich bildende Kohlensäure den Widerstand der Flächen ändert.

Zur Vermeidung der Parallaxe muss beim Ablesen der Zeigerstellung bei allen Versuchen sich das Auge auf derselben Stelle befinden, die als ideeller Schnittpunkt zweier in der Wand des Zimmers befestigter dünner Metallstäbe von je 1 m Länge genau fixiert ist. Es muss endlich noch erwähnt werden, dass die Versuche in einem gegen direktes Sonnenlicht geschützten Kellerraum des hiesigen phys. Instituts gemacht wurden, der wegen seiner constanten Temperatur ermöglicht, die Versuche verschiedener Tage direkt mit einander zu vergleichen.

Meine ersten Experimente galten der Frage, in welcher Beziehung die Geschwindigkeit der bewegten Fläche zu ihrem Luftwiderstand steht. Newton hat bekanntlich angenommen, dass der Luftwiderstand dem Quadrat der Geschwindigkeit des Körpers proportional sei[1]), und Schellbach hat in seiner bereits erwähnten Arbeit die experimentelle Bestätigung des Newtonschen

[1]) A. Wüllner, Experimentalphysik, 5. Aufl., Band I, pag. 668.

Gesetzes für Geschwindigkeiten von 17 cm bis zu 6 m gebracht.

Die heute ziemlich allgemein herrschende Ansicht geht dahin, dass, während bei Geschwindigkeiten bis zu einigen cm pro Sekunde der Luftwiderstand mit der ersten Potenz der Geschwindigkeit zunimmt, man allmählich zur zweiten, dann zur dritten und bei 500 m sogar zur vierten Potenz übergehen muss, um schliesslich bei 1200 m wieder zur zweiten Potenz zurückzukehren.

Es lag daher die Vermutung nahe, dass ich mit meinem Apparat, mit dem ich die Luftwiderstände noch genau messen kann, wenn die Geschwindigkeit der Fläche 25 m beträgt, eine wenn auch unbedeutende Abweichung von dem Newtonschen Gesetze wahrnehmen würde. Die Tabellen Ia und Ib geben zwei beliebig herausgegriffene Versuchsreihen über die Luftwiderstände ebener Scheiben bei verschiedenen Geschwindigkeiten wieder.

Tabelle Ia.

Versuche vom 20. Juni 1897 mit einer Papierscheibe von 14,5 cm D. Temperatur 17,5° C. Barometerstand 748 mm.

Geschwindigkeit in m pro Sekunde	Specifischer Widerstand	Abweichung vom Mittelwert
2,45	0,01176	0,00004
3,84	0,01193	0,00013
4,75	0,01178	0,00002
5,14	0,01175	0,00005
5,62	0,01194	0,00014
6,24	0,01188	0,00008
7,26	0,01181	0,00001
7,31	0,01185	0,00005
7,84	0,01161	0,00019
9,80	0,01169	0,00011
11,32	0,01197	0,00019
13,40	0,01191	0,00011
16,18	0,01177	0,00017
21,20	0,01177	0,00003
23,96	0,01198	0,00018

Tabelle Ib.

Versuche vom 27. Juni 1897 mit einer Aluminiumscheibe von 10 cm D. Temperatur 19° C. Barometer 742 mm.

Geschwindigkeit in m pro Sekunde	Specifischer Luftwiderstand	Abweichung vom Mittelwert
4,79	0,00937	0,00015
6,14	0,00932	0,00010
7,26	0,00924	0,00002
7,84	0,00906	0,00016
8,60	0,00909	0,00013
9,27	0,00930	0,00008
10,38	0,00926	0,00004
11,42	0,00933	0,00011
13,59	0,00897	0,00025
16,41	0,00910	0,00012
17,30	0,00909	0,00013
21,22	0,00924	0,00002
25,18	0,00936	0,00014

Die in der zweiten Vertikalreihe stehenden Zahlen wurden durch Division des Inhalts der Fläche und des Quadrates der Geschwindigkeit in den gemessenen Widerstand erhalten. Die Tabellen zeigen, dass dieser Quotient bei 25 m Geschwindigkeit nicht von demjenigen bei 2,4 m abweicht und ist somit das Newtonsche Gesetz bis zu max. 25 m Geschwindigkeit experimentell bestätigt.

Welche Gesetze bei noch höheren Geschwindigkeiten gelten, ob der Luftwiderstand allmählich den ihm nach dem Newtonschen Gesetze zukommenden Werth überschreitet oder ob infolge einer plötzlichen Verdichtung der vor dem Körper hergetriebenen Luftmasse der Luftwiderstand sich sprungweise ändert, ist noch nicht entschieden. Die letztere Annahme gewinnt aber an Wahrscheinlichkeit durch die Untersuchungen von E. Valler[1]), der an Geschossen nach-

[1]) E. Valler, „Sur les lois de la résistance de l'air". Comptes rendus 119, p. 885. Paris.

gewiesen hat, dass, wenn die Geschwindigkeit des Körpers der Schallgeschwindigkeit gleichkommt, ganz unerwartete Erscheinungen auftreten, und der Luftwiderstand sehr verschieden ist von dem Mittelwert des Widerstandes bei etwas geringerer und etwas höherer Geschwindigkeit.

Einen näheren Aufschluss über diese interessante Frage könnte man vielleicht erhalten, wenn man den in dieser Abhandlung beschriebenen Apparat in 10 facher Grösse ausführen würde, also mit einem als Brückenträger ausgebildeten, leichten Dreharm von 5 m Länge. Mit Hülfe einer Kraftmaschine von 5 P. S. würde man die Umfangsgeschwindigkeit bis auf 250 m pro Sekunde steigern können, ohne hierdurch die Empfindlichkeit der Methode zu verringern.

Um die Übersicht über die Versuche zu erleichtern, ist in den folgenden Tabellen der „specifische", d. h. der auf die Einheit der Fläche und Geschwindigkeit reducierte Luftwiderstand eingeführt worden. Hierbei wurden die Widerstände in g gemessen, die Einheit der Geschwindigkeit war 1 m pro Sekunde, und als Flächeneinheit wurde 1 qcm festgesetzt. Die Bezeichnung „specifischer" Luftwiderstand ist zwar üblich, aber doch nicht glücklich gewählt, da, wie durch die folgenden Versuche bewiesen wird, der specifische Widerstand von der Flächengrösse abhängig ist.

Die Versuche mit kreisrunden Scheiben von 6,6 bis 20 cm Durchmesser und verschiedenen Rechtecken sind in Tabelle II zusammengestellt.

Tabelle II.

Widerstände ebener Flächen.

Einheit der Geschw. = 1 m. Einheit des Fadenzuges = 1 g.
Einheit der Fläche = 1 qcm.

Form der Fläche	Inhalt der Fläche	Widerstand in g / Quadr. d. Geschw. in m	Spezifischer Widerstand
1. Kreis D = 6,6	34,17	0,264	0,00775
2. Kreis D = 10 cm	78,29	0,723	0,00922
3. Quadrat q = 8,87	78,37	0,739	0,00943
4. Rechteck a = 15,6, b = 5	78,11	0,784	0,01004
5. Kreis D = 12,6	124,47	1,31	0,01055
6. Kreis D = 14,5	165,36	1,95	0,01180
7. Quadrat a = 12,9	165,42	1,99	0,01201
8. Kreis D = 17,5	240,79	3,30	0,01328
9. Kreis D = 20	313,94	4,54	0,01442

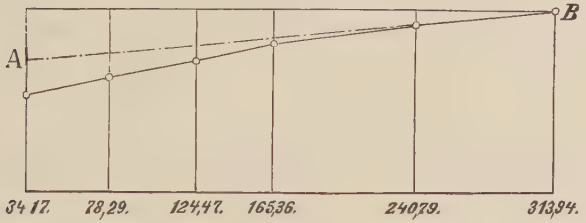
Bei der Bestimmung der Flächengrösse war der Querschnitt der Führungsaxe zu subtrahieren.

Aus der Tabelle geht hervor, dass der specifische Luftwiderstand bei jeder Vergrösserung der bewegten Scheibe zunimmt. In Figur 3 sind die Flächeninhalte als Abscissen und die entsprechenden specifischen Widerstände als Ordinaten aufgetragen. Die durch die Endpunkte der Ordinaten gelegte Kurve nähert sich für grössere Flächen sehr der geraden Linie AB, so dass man annehmen kann, dass der specifische Luft-

widerstand proportional der Flächenvergrösserung wächst, und dass die Abweichung von der geraden Linie nur den durch Führung und rotierenden Arm hervorgerufenen Luftströmungen zuzuschreiben ist.

Dieses Resultat steht in direktem Widerspruch zu den Untersuchungen, die W. H. Dines[1]) veröffentlicht hat. Derselbe sagt wörtlich: „eine Verminderung des Druckes pro Quadratfuss tritt ein in dem Maasse, wie die Oberfläche der Platte vergrössert wird". Dines hat den Luftwiderstand aus der Geschwindigkeitsverzögerung eines auf ebener Strasse laufenden Wagens ermittelt,

Figur 3.



zu dessen Bewegung eine bekannte Arbeit verwendet wurde.

Bei den meisten Abhandlungen über Luftwiderstände ist die Frage der Veränderlichkeit des specifischen Luftwiderstandes nicht behandelt worden; den hier beschriebenen Versuchen dürfte aber deshalb der Vorzug vor denen von W. H. Dines gebühren, weil bei vielen hundert Beobachtungen, die unter den verschiedensten Verhältnissen gemacht wurden, die Abweichungen sich immer in den Grenzen von ein Procent hielten, während Dines zugiebt, dass seine Resultate oft um 10—15 Procent von einander abwichen. Ferner weist

[1]) W. H. Dines, Proceedings of the royal society of London 1890, p. 233.

J. Freiburg[1]) an schwingenden Scheiben nach, dass bei kleinen Geschwindigkeiten bis zu 0,14 cm pro Sekunde, mit zunehmender Flächengrösse auch der spec. Widerstand wächst, und wenn auch bei den vorliegenden Versuchen die Geschwindigkeit durchschnittlich 10 000 mal so gross war, so kann doch hier kaum ein principieller Unterschied bestehen. Auch C. Örtling[2]) sagt in einer Abhandlung über die Gesetze des Luftwiderstandes, dass die allgemeinen Luftwiderstandsformeln einen Zusatz erhalten müssen, der als Faktor die Flächengrösse enthält, und schliesslich kommt auch Prof. Recknagel in seiner schon erwähnten Arbeit zu dem Resultat, dass der Gesamtwiderstand einer Platte sich zusammensetzt aus einem Überdruck gegen die Vorderseite und einem Minderdruck auf der Rückseite, und dass der Minderdruck auf der Rückseite mit der Vergrösserung der Platte wächst. Eine Verminderung des Druckes auf der Rückseite der Platte bei gleichbleibender Geschwindigkeit hat aber eine Vergrösserung des specifischen Widerstandes zur Folge, und ergeben somit auch die Recknagelschen Beobachtungen eine principielle Bestätigung meiner Versuche, wenn auch seine Methode zu umständlich ist, um genaue Zahlenwerte für eine grössere Anzahl von Flächen liefern zu können.

Aus Tabelle II geht ferner hervor, dass der specifische Luftwiderstand auch von der Gestalt der ebenen Fläche abhängt. Derselbe ist am kleinsten bei runden Scheiben, er hat bei einem Quadrat von gleicher Grösse einen um 2 Procent höheren Wert, während bei langgestreckten Rechtecken die Vergrösserung des specifischen Widerstandes bis zu 8 Procent betragen kann.

[1]) J. Freiburg, „Über Luftwiderstände bei kleinen Geschwindigkeiten“, Dissertation, Bonn 1886.

[2]) C. Örtling, Zeitschrift für Luftschiffahrt 14, p. 386 (1895).

2. *Ebene poröse Flächen.*

Bei den Untersuchungen über Luftwiderstände hat man sich bisher auf vollständig luftdichte Flächen beschränkt. Es schien mir aber von Interesse zu sein, die Erscheinungen zu beobachten, die auftreten, wenn eine mit vielen kleinen Öffnungen versehene Scheibe gegen ruhende Luft bewegt wird.

Solche Scheiben wurden hergestellt, indem man auf Ringe aus Aluminiumdraht poröse Stoffe, sog. „Gaze“, mit Kolophonium befestigte.

Tabelle III.

Widerstände durchlöcherter runder Scheiben.

Flächeninhalt	Geschwindigkeit	Specifischer Widerstand
I.	6,52; 11,80	0,00482; 0,00431
36,27	15,76; 18,03	0,00354; 0,00266
II.	6,64; 10,31	0,00527; 0,00486
78,51	14,65; 14,77	0,00405; 0,00318
III.	6,45; 9,4	0,00573; 0,00551
125,28	14,85; 18,31	0,00442; 0,00371
IV.	6,27; 10,47	0,00591; 0,00543
163,70	13,96; 18,25	0,00458; 0,00369
V.	6,78; 10,54	0,00632; 0,00583
242,47	12,99; 17,87	0,00484; 0,00391
VI.	6,51; 9,83	0,00664; 0,00608
316,63	14,15; 17,94	0,00535; 0,00419

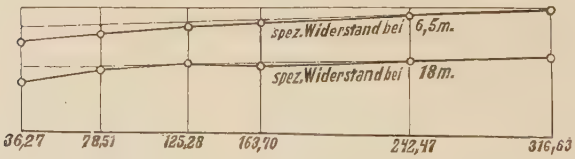
Tabelle III ergiebt die als Mittelwert aus einer grossen Zahl von Versuchen gefundenen Luftwiderstände bei je 4 verschiedenen Geschwindigkeiten. Aus derselben geht hervor, dass der specifische Widerstand bei porösen Flächen mit der Scheibengrösse bedeutend langsamer wächst wie bei den Vollflächen. Vergl. Fig. 3a. Diese Erscheinung ist nicht auffallend, wenn

man bedenkt, dass hier der Luftabfluss keine so erhebliche Rolle spielt, indem ein grosser Teil der vor der bewegten Fläche befindlichen Luft durch die Öffnungen direkt auf die Rückseite gelangen kann.

Tabelle III zeigt aber auch, dass hier das quadratische Widerstandsgesetz keine Gültigkeit mehr hat, dass vielmehr bei wachsender Geschwindigkeit der specifische Widerstand kleiner wird. Wie lässt sich diese überraschende Erscheinung erklären?

Zunächst schrieb ich sie der Beschaffenheit des porösen Tuches zu. Da nämlich die einzelnen Fäden der Gaze sehr zusammendrückbar sind, so war es denkbar, dass infolge der Luftströmung die Löcher sich er-

Figur 3a.



weiterten. Um hierüber Aufschluss zu erhalten, wurden die Versuche mit einer fein durchlöcherten Aluminiumscheibe wiederholt, die wegen ihrer Starrheit keine Veränderungen der Löcher zuliess. Aber auch hier wurden qualitativ dieselben Erscheinungen wahrgenommen, so dass man sie als allgemein gültig ansehen darf. Wahrscheinlich hängen sie mit der an der Oberfläche fester Körper verdichteten Luftschicht zusammen, die beim langsamen Fliessen der Luft durch die Poren in Ruhe bleibt und dadurch der strömenden Luft einen grösseren Widerstand leistet als bei grossen Durchflussgeschwindigkeiten, wo sie an der Bewegung teilnimmt und sogar zum Teil mit fortgerissen wird. Auch spielt wohl die Zusammendrückarbeit der Luft hier eine Rolle, indem bei einem Überdruck auf der Vorderseite die

durch die Löcher durchgepresste Luftmasse nicht nur infolge der Erhöhung der Durchflussgeschwindigkeit zunimmt, sondern auch wegen des Umstandes, dass die Luft in diesem Falle eine grössere Dichte hat.

Für die Segelschiffahrt dürfte die hier erörterte Erscheinung von Interesse sein, da aus derselben hervorgeht, dass durch undichte Segel die lebendige Kraft eines starken Windes schlechter ausgenützt wird, wie einer leichten Brise.

3. Gewölbte Flächen.

Während die Herstellung leichter ebener Platten keine Schwierigkeiten bot, waren mir bei gewölbten Flächen Beschränkungen auferlegt, da man hier Versteifungen durch Zugstangen nicht anbringen kann und selbst Flächen aus Zelluloid zu schwer werden. Nur 0,20 mm dicke Aluminiumbleche, die auf gusseisernen Kugeln „gedrückt" wurden, vereinigten die beiden Bedingungen der Leichtigkeit und der grossen Steifigkeit. Die in den Tabellen IV und V niedergelegten Versuche wurden mit solchen Kugelflächen angestellt.

Dass bei Kugelflächen der auf die Einheit der Grundfläche und auf die Einheit der Geschwindigkeit reducierte Luftwiderstand mit zunehmender Krümmung wächst resp. abnimmt, je nachdem man die konkave oder die konvexe Seite in Richtung der Bewegung stellt, ist nicht auffallend, obwohl L. Cailletet und E. Colardeau[1]), die am Eiffelthurme Fallversuche gemacht haben, und auch O. Lilienthal[2]) die Beobachtung gemacht zu haben glauben, dass schwache Krümmungen keinen Einfluss auf den specifischen Widerstand hätten.

---

[1]) Comptes rendus 115, p. 13, 1892, Paris.

[2]) Lilienthal „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst".

Tabelle IV.

Konkav gekrümmte Fläche *(Kugelhaube).*

Grundfläche: Kreis von 10 cm D.

Krümmungsradius in cm	Geschwindigkeit v in m	Fadenzug z z in g	$\frac{z}{v^2}$	Spezifischer Widerstand
I. ∞			0,723	0,00923
II. 15	10,37	78,1	0,731	0,00931
III. 12,5	10,35	78,7	0,736	0,00938
IV. 10	10,21	77,7	0,747	0,00951
V. 7,5	10,23	79,5	0,761	0,00967
VI. 6	10,21	80,2	0,769	0,00976
VII. 5	10,34	82,3	0,768	0,00975

Grundfläche: Kreis von 15 cm D.

Krümmungsradius in cm	v	z	$\frac{z}{v^2}$	
I. ∞			2,092	0,01188
II. 15	6,92	101,4	2,117	0,01203
III. 10	7,13	112,1	2,195	0,01241

Tabelle V.

Konvex gekrümmte Fläche.

Grundfläche: Kreis von 10 cm D.

Krümmungsradius in cm	$\frac{z}{v^2}$	Spezifischer Widerstand
I. ∞	0,723	0,00923
II. 15	0,642	0,00821
III. 12,5	0,598	0,00765
IV. 10	0,551	0,00706
V. 7,5	0,493	0,00627
VI. 6	0,482	0,00619
VII. 5	0,473	0,00606

Grundfläche: Kreis von 15 cm D.

Krümmungsradius in cm	$\frac{z}{v^2}$	Spezifischer Widerstand
I. ∞	2,092	0,01188
II. 15	1,461	0,00829
III. 10	1,147	0,00652

II. Teil.

Bestimmung des Luftwiderstandes beliebig geneigter ebener und gewölbter Flächen, die einer Bewegung unterworfen werden.

§ 1. Die bisherigen Rotationsapparate.

Während für den ersten Teil dieser Untersuchungen die Arbeit von Schellbach teilweise als Grundlage diente, werde ich bei den Versuchen über die Luftwiderstände schräg gestellter Flächen hauptsächlich auf Resultate hinweisen, die O. Lilienthal und S. P. Langley veröffentlicht haben.

Lilienthal lässt horizontal gestellte Stangen von 2 bis 7 m Länge um ihre verticale Axe rotieren. Die Rotation wird durch Abrollen von Gewichten bewirkt, und bestimmt er die Grösse der horizontalen Luftwiderstandskomponente durch Reduktion der treibenden Gewichte auf die Luftwiderstandscentren der Flächen. Um die verticale Komponente des Luftwiderstandes messen zu können, wurde die rotierende Axe mit den an ihr angebrachten Teilen durch einen Hebel mit Gegengewicht ausbalanciert. Die Axe, die drehbar auf dem freien Ende dieses Hebels ruhte, konnte sich heben und wurde bei den einzelnen Versuchen durch Gewichte soweit belastet, bis sie auf den Anfangspunkt zurücksank. In den aufgelegten Gewichten erhielt man dann die verticale Luftwiderstandscomponente.

Diese Anordnung ist für exakte Versuche nicht geeignet, denn die Antriebsvorrichtung des Abrollens von Gewichten erlaubt nicht, den einzelnen Versuch so lange auszudehnen, wie es zur Vermeidung störender Einflüsse der Umgebung notwendig ist. Während ich

bei meinen Versuchen erst den Widerstand von dem Moment an messe, wo vollständige Ruhe des Zeigers eingetreten ist, also erst, wenn ich die Gewissheit habe, dass keine störenden Luftströmungen vorhanden sind, giebt der Lilienthalsche Apparat gar keine Mittel an die Hand, kleine Störungen irgend welcher Art zu erkennen. Auch Geschwindigkeitsänderungen, die z. B. dadurch verursacht werden können, dass sich in die Räder des Getriebes Staub ansetzt, kann Lilienthal nur dann wahrnehmen, wenn dieselben so erheblich sind, dass dadurch die ganze ausbalancierte Masse merklich gehoben oder gesenkt wird, während ich die geringste Änderung der Geschwindigkeit, die sofort auch die Zeigerstellung verändert, durch meine Bandbremse ausgleiche.

Die von S. P. Langley zur Ermittelung des Widerstandes schräg gestellter Platten konstruierte Vorrichtung, die von ihm „Gesamtdruckschreiber“ genannt wird und an dem an früherer Stelle beschriebenen rotierenden Arm angebracht ist, steht auf einer so grossen Höhe der technischen Vervollkommnung, dass es gewagt scheinen müsste, etwas Besseres finden zu wollen, wenn nicht bei dem Versuche eine Fehlerquelle sich eingestellt hätte, die die gefundenen Werte stark beeinflusst. Langley beabsichtigte nämlich, die Versuche mit seinem unter freiem Himmel stehenden Apparat nur an vollständig windfreien Tagen anzustellen. Solche Tage blieben aber aus und auch nachdem nach der Hauptwindseite hin eine grosse Schutzwand errichtet worden war, machten sich immer noch störende Luftströmungen bemerkbar. Infolgedessen weichen die einzelnen Beobachtungen oft ganz bedeutend von einander ab, und da die einzelnen Versuche sehr zeitraubend sind, konnten sie nicht so häufig wiederholt werden, wie in diesem Falle notwendig war, wollte man den schädlichen Ein-

fluss der Luftströmungen eliminieren. So findet Langley z. B. bei einer quadratischen ebenen Fläche in drei aufeinander folgenden Versuchen für den specifischen Luftwiderstand die stark von einander abweichenden Werte

$$\frac{z}{v^2} = 0{,}097,$$

$$\frac{z}{v^2} = 0{,}066,$$

$$\frac{z}{v^2} = 0{,}070.$$

Wenn es aber auch Langley nicht gelungen ist, die Grösse des Luftwiderstandes absolut genau zu ermitteln, so ist es ihm doch vergönnt gewesen, mit seinem Apparat eine Erscheinung zu entdecken, die für das Flugproblem von grundlegender Bedeutung ist. Er hat nämlich nachgewiesen, dass ebene Scheiben, welche in horizontaler Lage horizontal vorwärts bewegt werden, die also keine verticale Druckcomponente besitzen, während sie zugleich frei herabfallen können, um so langsamer fallen, je grösser die Horizontalbewegung ist; und zwar wächst die Fallzeit schneller wie die seitliche Bewegung, sodass man die erstere beliebig verlängern kann.

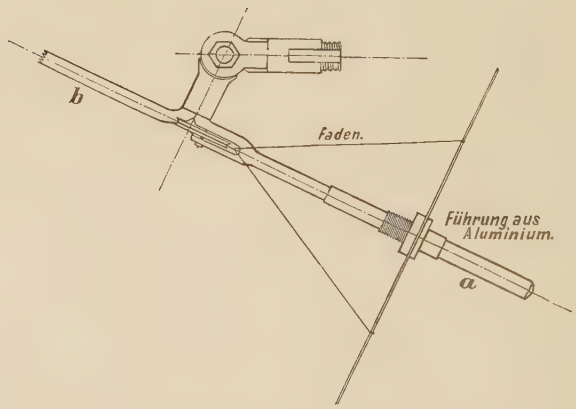
§ 2. Die neue Methode der Messung.

Die Versuche werden mit dem im I. Teil beschriebenen Apparat gemacht, nachdem man an dem rotierenden Arm eine neue Führung angebracht hat, die in Figur 4 veranschaulicht wird. Die Axe a ist in verticaler Ebene drehbar; infolgedessen kann der auf ihr verschiebbaren, mit dem Führungsmantel fest verbundenen Fläche jede gewünschte Neigung gegen die Horizontalebenen gegeben werden.

Die Führung besteht aus Messing; nur der Mantel

ist aus Aluminium und die Axe a aus glatt poliertem, gehärtetem Stahl, um den Reibungscoefficienten möglichst klein zu halten. (Der runde Stab b wird erst bei den im III. Teil beschriebenen Versuchen mit zwei hintereinander angeordneten Platten gebraucht.) Durch Drehung der Führung um 180°, und durch gleichzeitiges Umkehren der Rotationsbewegung kann man nacheinander den „Auftrieb" und auch den „Abtrieb" der geneigten Fläche für gleiche Neigungswinkel ermitteln. Dieses bietet eine einfache Kontrolle der Beob-

Figur 4.



achtungen, indem die so erhaltenen Werte um den doppelten Betrag der Fadenspannung von einander abweichen müssen, den die schräge Fläche, wenn sie schräg nach unten gestellt ist, infolge ihres Gewichtes schon vor der Bewegung des Apparates in dem Seidenfaden hervorruft. Bei schräg nach unten gestellten Platten befindet sich also der Aluminiumzeiger schon vor der Bewegung nicht mehr in der Nullstellung, sondern steigt mit fallendem Neigungswinkel allmählich bis auf Teilstrich 1,2 entsprechend einem Plattengewicht von 6 g. Dieser Wert ist natürlich von der während

des Versuchs abgelesenen Fadenspannung in Abzug zu bringen.

Die Versuche liefern den Luftwiderstand W in der zur Fläche senkrechten Richtung; die horizontale Componente desselben findet man durch Multiplikation von W mit dem Sinus des Neigungswinkels α, während der „Auftrieb" sich als $W \cdot \cos \alpha$ ergiebt. Zu dieser Annahme wird man berechtigt durch die Untersuchungen von W. H. Dines und S. P. Langley, die, obwohl mit sehr verschiedenen Methoden angestellt, darin übereinstimmen, dass man den wirkenden Luftdruck immer normal zur Fläche annehmen kann, wie im Falle eines ideellen Fluidums.

Zu diesen Versuchen war die in der Einleitung erwähnte Messvorrichtung von Dines sehr geeignet, da es sich hier nicht um die Ermittelung genauer Zahlenwerte, sondern um eine principielle Frage handelt, wo die ungleichförmige Bewegung des Windes keine Rolle spielt. Dines setzte eine 54 Quadratfuss grosse Platte unter verschiedenen Neigungswinkeln dem Winde aus und fand, dass immer die Tangentialcomponente des Luftdruckes gegenüber der verticalen Componente vernachlässigt werden darf. Die Lilienthalschen Versuche lassen sich hiermit nicht in Einklang bringen; aus denselben soll nämlich hervorgehen, dass bei schwach gewölbten Flächen der Luftwiderstand bei gewissen Neigungen überhaupt seine hemmende Wirkung verliert und unter Umständen eine solche Richtung zur erzeugenden Fläche bekommt, dass statt der hemmenden eine treibende Componente auftritt, dass also die Druckrichtung nicht hinter, sondern vor der normalen zur Fläche zu liegen kommt. A. v. Obermayer[1]) schreibt

[1]) Obermayer, Anzeiger der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften 18, p. 167, Wien 1894 oder: Fortschr. d. Physik 50, I, p. 401, 1894.

die Beobachtung von Lilienthal dem Umstand zu, dass nicht mit freien Systemen experimentiert wurde, sondern mit solchen, welche feste Axen enthalten.

Die Frage, wo bei geneigten Flächen das Centrum des Luftwiderstandes liegt, ist noch nicht entschieden; während J. Pillet[1]) sagt, dass der Normaldruck auf den geometrischen Schwerpunkt der Fläche wirke, vertritt Duroy de Bringnac[2]) die Ansicht, dass der Mittelpunkt des Druckes sich von dem Schwerpunkt der Fläche in dem Maasse entfernt, wie der Sinus des Neigungswinkels abnimmt. Dass mit kleiner werdendem Neigungswinkel das Centrum des Luftwiderstandes nach der Vorderkante der Fläche rückt, wird auch von Langley, Dines und Lilienthal behauptet. Es wird ferner von Obermayer bestätigt, der mit Hülfe des Dvorzakschen Schlierenapparates beobachtet hat, dass die auf der vorderen Flächenhälfte auftreffende Luft die für die hinteren Teile der Fläche bestimmten Luftschichten zum Teil ablenkt.

Mein Apparat gestattet nicht, diese Frage zu untersuchen, doch ist es auch für meine Messungen aus dem schon auf Seite 17 erörterten Grunde nicht von Bedeutung, ob das Centrum des Luftwiderstandes variiert oder immer genau mit dem Flächenmittelpunkt zusammenfällt.

Der Neigungswinkel der Fläche wird bestimmt, indem man eine mit Gradteilung versehene Messingscheibe von 15 cm Durchmesser, die in verticaler Ebene an einem gusseisernen Gestell befestigt ist, in die Nähe der Führungsaxe bringt und die letztere dann so lange verschiebt, bis das in gleicher Höhe befindliche Auge keine Abweichung von dem gewünschten

[1]) J. Pillet, Fortschr. d. Physik 41, I, p. 380, 1885.
[2]) Duroy de Bringnac, Fortschr. d. Physik 41, I, p. 376, 1885.

Neigungswinkel mehr wahrnehmen kann. Vor der Einstellung wird die Nullstellung des geteilten Kreises durch ein Lot kontrolliert.

§ 3. Anwendung der neuen Methode.

1. Ebene Scheiben.

Die in Tabelle VI niedergelegten Werte des Gesamtwiderstandes, der Horizontalcomponente desselben und endlich des Auftriebes sind in Figur 5 als Ordi-

Tabelle VI.

Kreisrunde Scheibe. Flächeninhalt = 126,31 qcm.

Neigungswinkel α	s in m	z in g	$\frac{z}{v^2}$	Spezifischer Widerstand	Horizontalkomponente	Auftrieb
90°	8,5	85,9	1,196	0,00948	0,00948	0
82,5	8,33	84,5	1,228	0,00976	0,00953	0,00124
75	8,41	70,9	1,27	0,01005	0,00968	0,00261
67,5	7,84	97,1	1,24	0,00983	0,00903	0,00374
60	8,87	93,4	1,198	0,00950	0,00823	0,00475
45	9,41	99,5	1,12	0,00889	0,00624	0,00622
41	9,8	97,8	1,06	0,00841	0,00547	0,00635
37,5	10,3	104,2	0,982	0,00778	0,00462	0,00618
30	11,2	91,0	0,728	0,00579	0,00289	0,00498
23	12,3	62,3	0,413	0,00326	0,00127	0,00301
15	14,6	47,2	0,227	0,00182	0,00047	0,00173
0	0	0	0	0	0	0

naten aufgetragen. Die punktierte Linie ergab sich durch Anwendung der Formel

$$W = \frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha} \varrho \, v^2,$$

die Lord Rayleigh[1]) aus den Principien der Hydrodynamik nach der Kirchhoffschen Theorie entwickelt hat. In der Formel bedeutet ϱ die Dichte des Me-

[1]) Lord Rayleigh, Beibl. d. Wied. Ann. 16, p. 584, 1892.

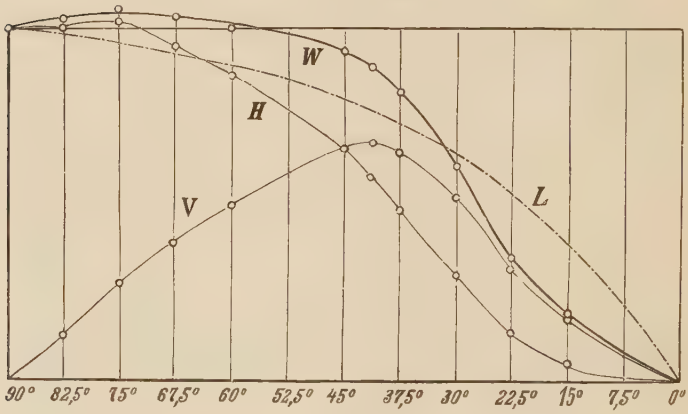
diums, v die Stromgeschwindigkeit und α den Winkel zwischen Stromrichtung und Platte.

Meine experimentelle Curve stimmt mit der Lord Rayleighschen besser überein wie mit der aus der Newtonschen Sinus - Quadratformel $W = K F v \sin^2 \alpha$, oder der aus der Duroy de Bringnacschen[1]) Formel $W = K F v \sin^3 \alpha$ resultierenden Linie.

Von praktischer Bedeutung ist sowohl das Maximum

Figur 5.

W = Gesamtwiderstand; *H* = Horizontalkomponente;
V = Auftrieb; *L* = theor. Curve von Lord Rayleigh.



des Auftriebes für eine gegebene Flächengrösse, das, wie ein Blick auf Figur 5 zeigt, bei $\sim 42^0$ liegt, als auch das Verhältnis der Ordinaten der beiden Curven V und H, die dem Auftrieb und der Horizontalcomponente entsprechen. Will man mit dem geringsten Kraftaufwand die grösste Hebekraft erzielen, so muss man der Fläche eine Neigung von $\sim 4^0$ geben, da hier das Verhältnis der V- zur H-Ordinate den grössten Wert hat. Man muss aber berücksichtigen, dass man, um

[1]) D. de Bringnac, Fortschr. d. Physik 41, I, p. 376, 1885.

gleiche Hebekraft zu erhalten, bei 4° Neigung eine 18mal grössere Fläche benötigt wie bei 42° Neigung, und wird also durch die Vermehrung des Flächengewichtes der Vorteil des geringeren Kraftaufwandes teilweise aufgehoben. Die Frage der günstigsten Flächenneigung muss man daher in jedem speciellen Fall unter Berücksichtigung des specifischen Flächengewichtes berechnen.

Meine Versuche mit langgestrecktem Reckstecken bestätigten die Langleyschen Beobachtungen, dass der Luftwiderstand grösser ist, wenn die längere Kante senkrecht zur Bewegung steht als wie im umgekehrten Fall.

2. Gewölbte Flächen.

Langley, Dines und Lilienthal haben bei ihren Untersuchungen gefunden, dass die ebene Fläche in Bezug auf die Hebewirkung nicht die günstigste ist. Über die Frage, welche gewölbte Fläche die günstigste ist, weichen aber ihre Ansichten von einander ab. Theoretisch lässt sich hier auch nichts voraussagen und man kann erst dann eine bestimmte Form als die günstigste bezeichnen, wenn man mit allen existierenden Flächen experimentiert hat. Aus dem schon erörterten Grunde standen mir nur Kugelflächen zu Gebote. Die Versuche mit 6 Flächen von verschiedenen Krümmungsradien ergaben, dass bis herunter zum Neigungswinkel von 25° eine Fläche den grössten Auftrieb hat, bei der das Verhältnis der Wölbungstiefe zum Durchmesser $= \frac{1}{7{,}5}$ ist, während bei kleineren Winkeln eine schwächere Krümmung eine grössere Hebewirkung hervorruft. In den Tabellen VII und VIII ist besonders auffallend, dass beim Neigewinkel von 0° immer noch ein kleiner Auftrieb vorhanden ist.

Tabelle VII.

Kugelhaube.

Krümmungsradius = 15 cm. Durchm. des Grundkreises = 15 cm.
Die konkave Seite ist nach vorne gekehrt.

Neigungswinkel α	$\frac{Z}{v^2}$	Spezifischer Widerstand	Horizontal-Komponente	Auftrieb
90°	2,117	0,01203	0,01203	0
75	2,260	0,01285	0,01241	0,00327
60	2,051	0,01163	0,01004	0,00582
45	1,641	0,00987	0,00697	0,00698
30	1,052	0,00596	0,00298	0,00516
15	0,510	0,00291	0,000756	0,00282
5	0,102	0,00058	0,000088	0,00057
0	0,071	0,000403	?	0,000403

Für kleine Neigungswinkel ist die Horizontalkomponente mit dem Apparat nicht messbar.

Tabelle VIII.

Kugelhaube.

Krümmungsradius = 10 cm. Durchm. des Grundkreises = 15 cm.
Die konkave Seite ist nach vorne gekehrt.

Neigungswinkel α	$\frac{Z}{v^2}$	Spezifischer Widerstand	Horizontal-Komponente	Auftrieb
90°	2,195	0,01241	0,01241	0
75	2,067	0,01167	0,01212	0,00315
60	1,793	0,01079	0,00931	0,005395
45	1,316	0,00744	0,00549	0,00527
30	0,947	0,00568	0,00284	0,00492
15	0,396	0,00226	0,000586	0,00218
0	0,072	0,00041	?	0,00041

Tabelle IX.

Kugelhaube.

Krümmungsradius = 15 cm. Durchm. des Grundkreises = 15 cm.
Die konvexe Seite ist nach vorne gekehrt.

Neigungswinkel α	$\frac{Z}{v^2}$	Spezifischer Widerstand	Horizontal-Komponente	Auftrieb
90°	1,461	0,00829	0,00829	0
75	1,158	0,00653	0,00631	0,00169
60	0,856	0,00483	0,00418	0,00242
45	0,658	0,00374	0,00264	0,00342
30	0,182	0,00102	0,00051	0,00088
15	0,118	0,00067	0,000174	0,00065
0	?	?	?	?

Die Tabelle IX ergiebt die Widerstände der Kugelflächen, wenn die convexe Seite in Richtung der Bewegung steht. Hier tritt schon, namentlich wenn die Krümmung gross ist, lange bevor der Neigungswinkel $= 0^0$ wird, kein Auftrieb mehr ein.

Es muss aber bemerkt werden, dass zum Messen der geringen Kräfte, die bei ganz kleinen Neigungswinkeln auftreten, meine Versuchsmethode nicht mehr sehr zuverlässig ist, und es hier zweckmässiger wäre, die Versuche in grösserem Maassstabe, z. B. mit dem Langleyschen Apparate, anzustellen.

Standen die bewegten Flächen senkrecht zur Bewegungsrichtung, so hatte eine rauhe Oberfläche, die ich herstellte, indem ich grobkörnigen Sand auf eine Aluminiumplatte aufklebte, keinen merklichen Einfluss auf die Grösse des Luftwiderstandes. Auch bei schräg gestellten Flächen spielte die Oberflächenbeschaffenheit nur dann eine Rolle, wenn der Neigungswinkel sehr klein wurde. In diesem Falle trat bei rauhen Flächen wohl deshalb eine Vermehrung des Widerstandes um einige Procent ein, weil durch die Erhöhungen auf der Fläche entferntere Luftschichten mit fortgerissen wurden, die bei glatten Flächen an der Bewegung nicht mehr teilnahmen.

III. Teil.

§ 1.

Die Beobachtung von Prof. Schellbach, dass eine Erhöhung der Temperatur eine Verminderung des Luftdruckes um etwa 3 Promille verursacht, fand ich nicht bestätigt; vielmehr ergab eine Vergleichung mehrerer bei constanter Feuchtigkeit der Luft und constantem Barometerstand, aber verschiedener Temperatur gemachter Versuche, dass die Erhöhung der Temperatur auch eine Erhöhung des Widerstandes zur Folge hat. Leider waren die erreichbaren Temperaturdifferenzen nicht gross genug, um einen einwandfreien Zahlenwert der Widerstandsvermehrung liefern zu können. Meine überraschende Beobachtung findet eine teilweise Erklärung durch die Untersuchungen von Baille[1]), der gefunden hat, dass der Widerstand der Gase bei gleicher Dichte um so grösser wird, je höher die Temperatur steigt.

Meine Beobachtungen, dass mit zunehmendem Barometerstand auch der Luftwiderstand zunimmt, sind nicht auffallend. Schon L. Cailletet und E. Colardeau[2]), die den Widerstand verschiedener verdünnter und comprimierter Gase untersucht haben, sind zu dem Resultat gekommen, dass der Widerstand proportional dem Drucke ist, unter dem die Gase stehen.

§ 2.

Professor Recknagel sagt in seiner schon erwähnten Abhandlung, dass, wenn ein Rotationsapparat in Thätigkeit ist, er die ganze Atmosphäre des Zimmers in Rotation versetzt und zwar im Sinne der Bewegung der

[1]) Baille, Fortschr. d. Physik 39, I, p. 269, 1883.
[2]) Comptes rendus 17, p. 245.

rotierenden Flächen. Diese Luftbewegung, die er „Mitwind“ nennt, ist nach seiner Ansicht der Hauptübelstand aller Rotationsapparate und von wesentlichem Einfluss auf die gefundenen Werte, indem nach einer halben resp. ganzen Umdrehung die zu untersuchende Fläche nicht mehr auf ruhende Luft stösst. Nach Recknagel ist der Mitwind der Geschwindigkeit der rotierenden Scheibe nahezu proportional und beträgt meistens etwa 5 Procent derselben.

Um die Richtigkeit dieser Annahme zu prüfen, wurden einige Versuche angestellt, die mir geeignet schienen, einen näheren Aufschluss über den Verlauf der Luftströmungen zu geben.

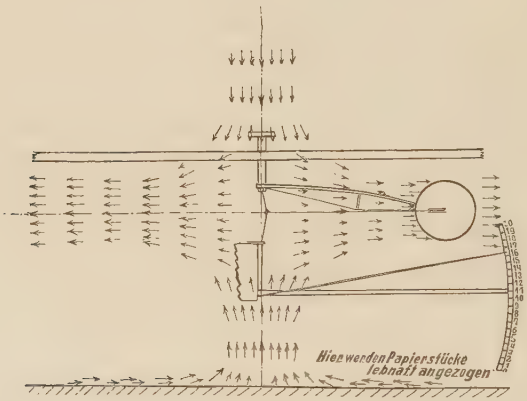
Zunächst wurden kleine Fähnchen aus dünnem Seidenpapier, die um Axen, die durch ihre Schwerpunkte gingen, leicht drehbar waren, an den verschiedenen Punkten des Raumes aufgestellt, und sodann der Rotationsapparat in Bewegung gesetzt. Die sich nach kurzer Zeit in bestimmte Richtung einstellenden Fähnchen liessen unzweideutig erkennen, dass die Centrifugalkraft die durch die rotierenden Flächen in Bewegung gesetzte Luft nach aussen schleudert, und dass die hierdurch entstehende Luftverdünnung eine continuierliche Luftströmung von innen nach aussen verursacht, wie es Figur 6 veranschaulicht.

Der Winkel, unter dem die vor der Fläche hergetriebene Luft dieselbe verlässt, beträgt etwa 35^0 und kann demnach nur $v \cdot \sin 35^0$ als Mitwind bezeichnet werden, wenn v die gemessene Geschwindigkeit der Luftströmung ist.

Da die Tourenzahl meines Apparates sehr gross ist, so wäre die Ermittelung der in dem Augenblick vor dem Erscheinen der rotierenden Flächen vorhandenen Luftbewegung nur durch ein Pendel möglich, das eine sehr kleine Schwingungsdauer hat. Dass diese

Bewegung aber bei meinem Apparat nur einen verschwindend kleinen Wert haben kann, ergiebt sich aus dem Umstand, dass bei den verschiedenen Geschwindigkeiten das quadratische Widerstandsgesetz beobachtet werden konnte. Wäre die Recknagelsche Annahme von dem grossen Einfluss des Mitwindes richtig, so hätte auch Schellbach bei seinen Versuchen überhaupt nicht das Newtonsche Widerstandsgesetz finden können.

Figur 6.



Ein angenähertes Bild der Luftströmung erhält man auch, wenn man eine gleichmässig mit feinem Streusand bedeckte ebene Fläche an verschiedenen Punkten des Raumes aufstellt. An den Stellen, wo die Luft sich in geradliniger Bewegung befindet, wird aller Sand weggeblasen; an den Punkten dagegen, wo Wirbelbewegungen vorhanden sind, bilden sich kleine Sandhaufen. Die auf diese Weise entstehenden Figuren, die einen scharf ausgeprägten Charakter haben, sind sowohl abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit als auch von der Form der rotierenden Flächen.

Professor Schellbach sagt in seiner schon oft erwähnten Abhandlung, dass der Luftdruck sich bedeu-

tend vermindert, wenn grosse Flächen in die Nähe des Rotationsapparates gebracht werden. Dies ist aber nicht immer zutreffend; es kommt nämlich wesentlich darauf an, wo die Scheibe angebracht wird. Steht sie Luftschichten im Wege, die im Begriff sind, zur rotierenden Fläche hinzuströmen (vergl. Figur 6), so vermindert sie den Luftwiderstand; stellt man sie dagegen senkrecht zu Luftschichten, die infolge der Centrifugalkraft vom Apparat weggeschleudert werden, so vermehrt sie den Luftdruck, wenn auch lange nicht in dem Maasse, wie sie ihn im ersteren Falle verkleinerte. Flächen, die ausserhalb der in Figur 6 aufgezeichneten Luftbewegung liegen, spielen nur dann eine Rolle, wenn sie sehr nahe an den Apparat herangebracht werden.

§ 3.

L. Cailletet und E. Colardeau[1]) haben gefunden, dass, wenn mehrere Flächen hintereinander angeordnet werden, hierdurch der Luftwiderstand der verschiedenen Flächen sich stark ändert. Zwei mit 20 m Geschwindigkeit sich bewegende Platten von 15 cm Durchmesser hatten im Abstand von 15 cm von einander kaum $^1/_{10}$ mehr Widerstand wie eine Platte allein. Selbst wenn der Plattenabstand auf 1 m wuchs, so war immer noch eine Verminderung des Widerstandes wahrnehmbar.

Mein Apparat ist für Versuche über diese wichtige Frage sehr geeignet. Ich bestimmte die Widerstände der vorderen und hinteren Platte, wenn dieselben auf der in Figur 4 dargestellten Führung in verschiedenen Abständen von einander so angebracht wurden, dass nur die eine Platte sich vor- und rückwärts verschieben konnte, während die andere durch Fäden befestigt

---

[1]) L. Cailletet, Fortschr. d. Physik 49, I, p. 382, 1893 oder Comptes rendus 117, p. 245.

wurde. Es stellte sich heraus, dass, während der Widerstand der vorderen Platte keine nennenswerte Verminderung erfuhr, dies bei der hinteren Platte in hohem Maasse der Fall war. Bei 10,4 m Geschwindigkeit hatte die hintere Fläche nur einen specifischen Widerstand von 0,00298, wenn der Abstand von der Vorderfläche 9,5 cm betrug. Eine grössere Annäherung der Flächen war bei der vorhandenen Führung leider nicht möglich. Tabelle X zeigt, dass mit wachsender

Tabelle X.

Zwei hintereinander angeordnete Scheiben von 10 cm D.

Der Widerstand der hinteren Scheibe wird gemessen.
Geschwindigkeit $\sim$ 10 m pro Sekunde.

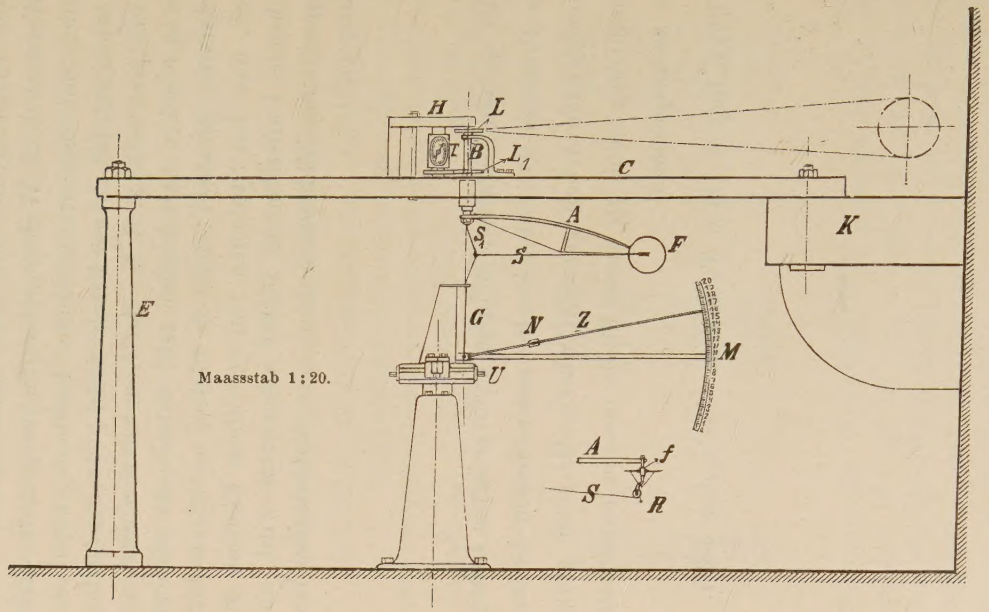
Abstand der Scheiben in cm	Spezifischer Widerstand der hinteren Scheibe	Abweichung vom ungestörten Widerstand
9,5	0,00298	— 0,00624
10,2	0,00386	— 0,00536
11,5	0,00512	— 0,00410
12,5	0,00654	— 0,00268
13,7	0,00721	— 0,00201
15,4	0,00847	— 0,00075
16,7	0,00963	+ 0,00041
17,0	0,00956	+ 0,00034
17,5	0,00958	+ 0,00036
18,1	0,00907	— 0,00015

Entfernung der Widerstand der hinteren Fläche rasch steigt, bei 16,1 cm Distanz ebenso gross ist als in dem Falle, wo die Vorderfläche fehlt, dass er dann sogar grösser wird und bei 16,7 cm ein Maximum erreicht. Demnach sind die Cailletetschen Beobachtungen nicht allgemein gültig, und ist es bei einem System von hintereinander angeordneten Flächen möglich, eine Erhöhung des specifischen Widerstandes zu erhalten, wenn

man nur die Abstände der Flächen richtig wählt. Dieser günstigste Abstand ändert sich mit der Geschwindigkeit, der Flächengrösse und der Flächenform.

Wenn auch die Widerstandsvermehrungen, die wahrscheinlich mit discontinuierlichen Luftbewegungen zusammenhängen, bei ebener Fläche nicht bedeutend genug sind, um praktisch, z. B. bei der Konstruktion eines aus mehreren Flächen bestehenden und daher sehr stabilen Fallschirmes, grosse Vorteile zu bieten, so ist es doch möglich, dass bei Systemen von gewölbten Flächen die entstehende Luftströmung besser ausgenutzt wird, und der specifische Widerstand hier eine bedeutende Vermehrung erfährt.

Es sei mir gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. Oberbeck, unter dessen Leitung die vorliegende Arbeit gemacht wurde, für seine gütige Unterstützung auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Phys. Inst. d. Univ. Tübingen. November 1897.

Rotations-Apparat.